

## アポロ熱流量データの再解析-月食時および周期的温度変動解析による月表層熱物性の推定-

### Re-analysis of Apollo heat-flow data -Estimation of the thermal properties of regolith from the periodic and transient components-

滝田 隼 [1]; # 斎藤 靖之 [2]; Axel Hagermann[3]; 宝来 帰一 [4]; 田中 智 [3]  
Jun Takita[1]; # Yasuyuki Saito[2]; Hagermann Axel[3]; Ki-iti Horai[4]; Satoshi Tanaka[3]

[1] 東大・理・地球惑星; [2] 東大・理・地惑; [3] 宇宙研; [4] 宇宙研

[1] Earth and Planetary Sci., Tokyo Univ; [2] Earth and Planetary Sci., Tokyo Univ.; [3] ISAS; [4] ISAS/JAXA

アポロ月探査計画では月熱流量観測を目的として表層付近の温度測定実験が計画され、アポロ 15 号および 17 号で実施された。熱流量は月を形成する材料物質および月内部の温度分布の推定を可能にする。月の現在の熱的狀態を明らかにすることは、地球を含めた太陽系固体惑星の生成から現在に至る進化過程を推察するための重要な情報を与える。

月熱流量は月を形成する物質の熱伝導率と垂直温度勾配の積で求めることができる。過去の研究では、月面における年周期の温度変動の振幅が月レゴリス中で減衰する割合から、月表面下数 m 程度までの月レゴリスの熱拡散率が  $1E-8 \text{ m}^2/\text{s}$  程度と求められた (Langseth et al., 1976)。これに対し、本研究は月の日周温度変動ならびに月食時の温度変動現象に着目し、月レゴリスの熱物性推定を試みた。日周期の温度変化は年周期に対して変動周期が短く、温度振幅の減衰および位相遅れを精度よく決めることができる。月食時の温度変動は特に位相遅れの決定において有利である。位相遅れからの評価は先行研究に見られず、日周温度変動のデータに関して一部のデータが評価されたのみである。

取得した全熱流量データ中の温度プロファイルを調査したところアポロ 15 号の実験で設置された月面下 35cm に位置する測定点で取得したデータ中に月食に起因した有意な温度変化を見出し、媒体中の温度振幅および位相差をそれぞれ算出した。

レゴリスの熱物性を推定するために、一様な物性分布を持つと仮定した媒体中の月の日周期と月食時の温度変動をシミュレートするモデル計算を行った。年周期解析結果から推定された熱拡散率  $=1E-8 \text{ m}^2/\text{s}$  を仮定した結果、観測された日周変動による昼夜の温度振幅及び月食時の温度低下幅を再現するものとなった。しかしこの拡散率を仮定すると、月食時の表面温度変動ならびに日周温度変動が温度計測点に到達するまでの時間的遅れおよび、観測された温度変動の波形を再現することができず、観測データの位相遅れを説明するためには、モデル計算において媒質の熱拡散率を  $=1E-6 \text{ m}^2/\text{s}$  と仮定する必要がある。この場合、モデルが生成する日周期および月食時の温度プロファイルは、実験で記録された深さにおける温度波形と温度振幅は異なるが、波形に相似関係が成り立つことが判明した。

今回、先行研究で未解決であったアポロ 15 号、17 号のそれぞれの計測プローブで記録された日周温度変動の波形の違いは、各々の熱入力条件の違いを考慮して 1 次元熱伝導方程式を解くことで再現できた。ただしいずれの場合も、熱伝導を考える媒体の熱拡散率を  $=1E-6 \text{ m}^2/\text{s}$  程度を仮定しなければ計測波形を再現できなかった。温度振幅はこの場合も  $=1E-8 \text{ m}^2/\text{s}$  程度で計測値を再現する。このことはアポロ 15 号と 17 号の日周変動が見出されているほぼ全てのデータにおいて共通に見られた。したがってこれが生じる原因は、熱流量観測の計測系に起因するものか、あるいは月表層の物性に共通して見られる性質のどちらかであると考えられる。

計測系における月面に入射した熱がセンサーまで到達する主な経路を考察したところ、次の 3 つの可能性を得た。まずレゴリスより高い熱拡散率を有するポアシステム (プローブ設置用の円筒) と、プローブを月面にある電子機器とつないでいるケーブルが温度計測に影響を与えている可能性がある。そこでポアシステムの熱伝導を考慮した数値計算を行ったところ、この可能性は低いという結果を得た。ケーブルの熱伝導に関しては、ケーブルの詳細な構造および物性値が不明なため定量的に評価できていないが、表面からの熱の散逸を伴う熱伝導メカニズムを考慮することで減衰率と位相遅れの両者において計測データを説明できる可能性がある。一方、月レゴリスの熱拡散率が  $=1E-6 \text{ m}^2/\text{s}$  であると仮定することで計測データを説明できる可能性がある。ただしこれは月から持ち帰られたレゴリスサンプルの熱拡散率測定結果に対して 100 倍程度大きく、これとは相容れないものである。

年周期の位相遅れからは  $=1E-8 \text{ m}^2/\text{s}$  が推定されるため、本研究の結果とは現時点ではつながらない。タイムスケールの異なる年周期、日周期そして月食時からの推定結果を系統的に説明するメカニズムの解明が必要である。これは重要な課題であるが、ケーブルの熱伝導により、深い位置に設置されたセンサーが計測した結果に影響を与える可能性については、年周期の温度振幅から推定した結果に関して再評価が必要になることを示唆する。